REPOSIT



Verkehrsflugzeuge am Lebensende

Dieter Scholz

2022

Publikationsstatus: Publizierte Version

Typ des Dokumentes: Bericht

Empfohlene Zitierung:

SCHOLZ, Dieter, 2022. *Verkehrsflugzeuge am Lebensende*. Bericht. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Aircraft Design and Systems Group (AERO).

Zitierlink:

DOI: https://doi.org/10.48441/4427.359
Handle: http://hdl.handle.net/20.500.12738/12636

Nachnutzung:

Das Werk ist lizenziert unter Creative Commons *Namensnennung* 4.0 International (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0



Dieter Scholz

Verkehrsflugzeuge am Lebensende

Jährlich erreichen etwa 1000 Verkehrsflugzeuge ihr Lebensende. Das sichere, verantwortungsvolle und gleichzeitig wirtschaftliche Recycling dieser Maschinen ist eine große Herausforderung, die schon beim Entwurf neuer Flugzeuge bedacht werden muss. Doch gerade die vermehrt zum Einsatz kommenden Verbundwerkstoffe sind ein Recyclingproblem. Eine neue Flugzeugdemontageindustrie entsteht. Auch bei den Recyclingverfahren tut sich einiges.

Lange Zeit wurde das Lebensende von Flugzeugen wenig beachtet. Das Konzept bestand darin, unwirtschaftliche Flugzeuge einfach bis auf weiteres auf Flugzeugfriedhöfen (aircraft boneyards) oder am Rand von Flugplätzen abzustellen. Die vollständige Demontage (oder: Rückbau) der Flugzeuge war unwirtschaftlich. Das war auch der Grund für eine weitgehend fehlende Flugzeugdemontageindustrie. Prädestiniert für Flugzeugfriedhöfe sind Weltregionen mit viel preiswertem Platz. Das sind die Wüsten. Flugzeugfriedhöfe liefern die eindrucksvollen Bilder von Flugzeugen, die zu tausenden für die Ewigkeit in den Wüsten abgestellt wurden[1]. Viele Flugzeugfriedhöfe beherbergen militärische Flugzeuge und viele befinden sind in den USA[2]. Der weltweit größte Flugzeugfriedhof mit mehr als 4000 stillgelegten Luftfahrzeugen ist 309th AMARG, das zentrale Lager der US-Streitkräfte in Tucson, Arizona.



Diese F-84 wurden in den 1950er Jahren ausgemustert und im heutigen 309th AMARG, Tucson, Arizona (USA) abgelegt. Ein Foto aus dem Jahr 1980. Quelle: Wikipedia (gemeinfrei).

---

1 https://www.stern.de/reise/follow-me/das-sind-die-groessten-flugzeug-friedhoefe-der-welt-9512134.html

2 https://www.airplaneboneyards.com/airplane-boneyards-list-and-map.htm
https://www.airplaneboneyards.com/images/map-major-airplane-boneyards-western-usa.jpg
https://www.google.com/maps/d/embed?mid=1vrHdfk0nPqTX3GEv2Tc3-tTvq4s&ehbc=2E312F

Das Ende des Lebenszyklus der Flugzeuge hat aber in den letzten beiden Jahrzehnten stark an **Bedeutung** gewonnen. Es geht nicht mehr um das Abstellen der Flugzeuge für immer, sondern vielmehr nur um ein temporäres Abstellen, im besten Fall gefolgt von der Wiederinbetriebnahme oder aber der Zerlegung. Dieses Vorgehen vermeidet die Ansammlung von immer mehr Flugzeugen. Der größte Betrieb in Europa befindet sich am Flugplatz von Teruel in Spanien. Dort können 140 Flugzeuge – und damit vergleichsweise wenig – aufgenommen werden.



Canadair CRJ 100 am Kingman Airport, Arizona (USA) im Jahr 2013. http://www.aeroprints.com (CC BY).



Flugzeuge abgestellt am Flugplatz von Teruel bei Tarmac Aerosave. Quelle: https://www.tarmacaerosave.aero.

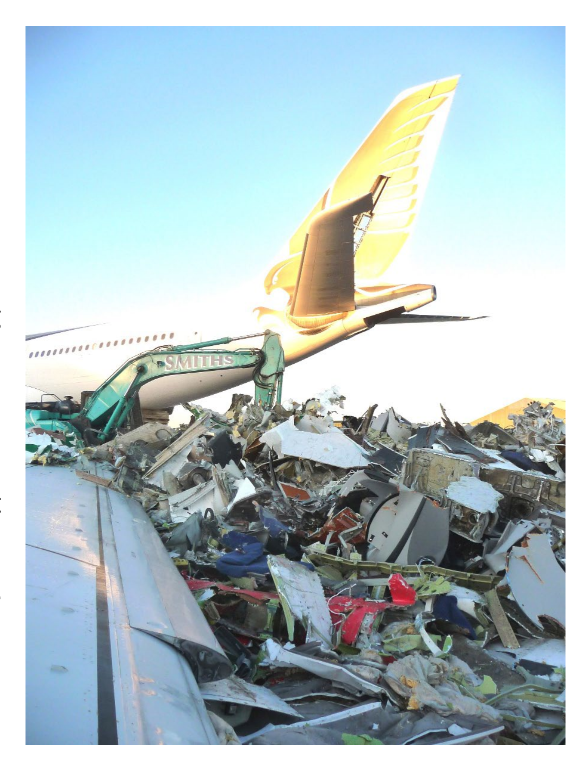
Der Lebenszyklus eines Flugzeugs kann in grundlegende Phasen unterteilt werden: Entwicklung, Produktion, Betrieb/Wartung und Ende des Lebenszyklus (End of Life). Der Lebenszyklus kann mit einer Ökobilanz oder englisch Life Cycle Assessment (LCA) nach ISO 14040 und ISO 14044 analysiert werden. Die Methode wurde für die Anwendung bei Flugzeugen ergänzt[3]. Danach ist über den gesamten Lebenszyklus betrachtet der Flugbetrieb mit mehr als 99 % dominierend. Das liegt daran, dass der Flugbetrieb jeden Tag stattfindet, die Produktion und die Prozesse am Lebensende aber nur einmal im Flugzeugleben. Die Entwicklung findet sogar nur einmal für alle gebauten Flugzeuge des Musters statt. Die Umweltwirkung der Entwicklung verteilt sich also noch mehr. In diesem Artikel geht es um das Lebensende von Flugzeugen – und damit eigentlich um einen verschwindend kleinen Teil der Umweltwirkung der Flugzeuge. Trotzdem liegt hier eine

[3] Johanning, Andreas, 2017: Methodik zur Ökobilanzierung im Flugzeugvorentwurf. München, Verlag Dr. Hut. Dissertation. Download from: http://Airport2030.ProfScholz.de

gigantische Aufgabe vor. Im Oktober 2020 wurden im "World Airliner Census"[4] weltweit 29000 Passagierflugzeuge angegeben. Davon waren zu dem Zeitpunkt 9000 gelagert. In den nächsten 30 Jahren werden also etwa 29000 Passagierflugzeugen das Lebensende erreichen – egal, wie es mit dem Wachstum der Zivilluftfahrt weitergehen wird. Das sind 1000 Flugzeuge pro Jahr.

Diese Aufgaben stehen am Lebensende an:

1. Stilllegung (decommissioning),
2. vorsichtige Demontage (disassembly) und
3. gewaltsames Auseinandernehmen (dismantling).



Nachdem das Flugzeug zerlegt wurde wird je nach Komponente oder Material unterschieden in Wiederverwendung (recycling) oder Entsorgung (disposal). Aus ökonomischen und ökologischen Gründen wird angestrebt, einen möglichst hohen Prozentsatz der Wiederverwendung zu erreichen (Recyclingquote). Was aber nicht wiederverwendet werden kann muss entsorgt werden. Hier kommen z. B. in Betracht die Deponierung (landfill) oder die Verbrennung (incineration). Beim Recycling wird unterschieden zwischen der Nutzung von Sekundärbauteilen und Sekundärrohstoffen. Entsprechend kann auch zwischen einer Bauteil-Recyclingquote und einer stofflichen Recyclingquote unterschieden werden. Flugzeuge erreichen eine Recyclingquote (bezogen auf die Masse) zwischen 60 % und 85 %, mehr wird angestrebt.



Zerschneiden eines Flügels bei Tarmac Aerosave. Quelle: https://www.tarmacaerosave.aero.

[4] Flight Global, 2020-10-05: World Airliner Census 2020 – Data from CIRIUM. Archived at: https://perma.cc/P4BQ-7H97, https://perma.cc/2MNB-FZP5.

Die Bombardier CS100 erhielt 2016 die erste Umweltproduktdeklaration der Branche. Die vom International EPD(R) System veröffentlichte, von Dritten geprüfte CS100-Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration, EPD) der Firma zeigt Informationen über die Umweltauswirkungen des Flugzeugs im Lebenszyklus. Im Flugzeugentwurf wurde die Verwendung von Materialien mit hoher Recyclingquote angestrebt. Letztlich wurde eine Recyclingquote von 83 % erreicht. Jedoch wollte Bombardier eine weitere Verbesserung der Recyclingquote seiner Flugzeuge bis 2025 auf 100 % erreichen[5]. Heute ist die CS100 als A220 ein Flugzeugmuster von Airbus.

Bei Flugzeugen hat das Recycling von Bauteilen eine wirtschaftlich große Bedeutung. Flugzeugkomponenten sind teuer, daher können auch gebrauchte Teile noch hohe Preise erzielen. Bestimmte Komponenten im Flugzeug sind als lebensbegrenzte Komponenten (Life-Limited Parts) ausgewiesen. Diese Komponenten haben eine Lebensdauer, die in Flugstunden, Zyklen oder Kalenderzeit beschrieben ist. Eine korrekte technische Dokumentation ist Teil der Lufttüchtigkeit und muss eine Rückverfolgbarkeit "Back to Birth" erlauben. Aus der Dokumentation muss stets der Lebensstatus in Flugstunden, Zyklen oder Kalenderzeit hervorgehen[6,7]. Für Gebrauchtteile aus dem Recycling ergibt sich die Funktionsfähigkeit aus der Tatsache, dass sie fehlerfrei beim letzten Flug betrieben wurden oder durch eine Qualitätsprüfung. Komponenten aus dem Recycling können mit ihrem gegenwärtigen Lebensstatus verkauft werden, oder werden nach einer entsprechenden Wartung wie neu verkauft.



Flugzeugteile werden ausgebaut, beschriftet, auf Qualität geprüft, evtl. gewartet und zum Verkauf verpackt.

---

5 Bombardier, 2016: Environmental Product Declaration (EPD) – CS100. Archived at: https://perma.cc/WA83-K9U2

6 Sofema Aviation Services, 2020: EASA/FAA Life limited Parts & Back to Birth Traceability. Archived at: https://perma.cc/9XAT-AKQS.

7 https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/43.10

Das Lebensende hat nicht zwangsläufig etwas mit dem Alter oder der gesamten Nutzung des Flugzeugs zu tun. Unabhängig von Flugstunden und Flugzyklen wird ein Flugzeug obsolet, wenn es im Vergleich zu anderen Flugzeugen zu hohe Betriebskosten verursacht, oder einfach keine Nachfrage nach Flügen existiert. Die Betriebskosten alter und neuer Flugzeuge unterscheiden sich bei Abschreibung, Wartungs- und Kraftstoffkosten. Neue Flugzeuge haben geringe Wartungskosten und durch moderne Technik einen geringeren Verbrauch und damit geringere Kraftstoffkosten. Alte Flugzeuge haben wenig oder keine Abschreibung und können daher auch bei geringer Nutzung noch wirtschaftliche betrieben werden. Frachtflugzeuge (oder Löschflugzeuge) haben eine geringere Nutzung als Passagierflugzeuge und erfordern keine regelmäßige teure Erneuerung der Kabine und können daher länger in Betrieb gehalten werden. Passagierflugzeuge können unter günstigen Umständen etwa 30 Jahre lang wirtschaftlich betrieben werden. Das Lebensende eines Flugzeugs wird aber immer durch eine wirtschaftliche Abwägung festgestellt. Das Lebensende kann schon nach 13 Jahren eintreten, wie kürzlich im Fall einiger Flugzeuge vom Typ Airbus A380. Wenn es keinen Käufer für das gebrauchte Flugzeug gibt, dann bleibt nur die Entscheidung zwischen weiterem Betrieb oder Verschrottung. Dann werden die Verluste aus dem Flugbetrieb verglichen mit dem verlorenen Restwert gemindert um die Einnahmen aus dem Recycling. Beim Recycling versucht man das Flugzeug in Einzelteilen zu verkaufen. Am wertvollsten sind dabei die Triebwerke, die nicht nur verkauft, sondern auch vermietet werden können. Gebrauchte Ersatzteile haben dann einen höheren Wert, wenn es noch einige fliegende Flugzeuge des Musters gibt, die eine Nachfrage nach den Ersatzteilen generieren.



Unter den frühen A380, die demontiert werden sollen, befindet sich dieses ehemalige Flugzeug der Singapore Airlines. Es erreichte nur ein Alter von 13 Jahren. Quelle: Flight Global (2021-11-09).

Das Lebensende beginnt oft schleichend. Ein Flugzeug, welches heute keinen Platz am Markt hat, kann evtl. später wieder gebraucht werden. Grund dafür sind Schwankungen bei Angebot und Nachfrage und die sich ändernder Möglichkeiten Gewinne zu erzielen. Ein Betreiber wird daher bereit sein, das Flugzeug bei geringen laufenden Kosten ungenutzt stehen zu lassen, für die Möglichkeit das Flugzeug bei Bedarf zu reaktivieren. Dabei kann zwischen Parken (parking) und Lagern (storage) unterschieden werden[8].

Das Parken wird genutzt für Luftfahrzeuge, die nur kurzfristig aus dem Betrieb ausscheiden sollen. Beim Parken soll die Anzahl der Aufgaben minimiert werden, die erforderlich werden, um das Luftfahrzeug wieder in den Flugbetrieb zu nehmen. Dazu müssen aber während des Parkens eine Reihe wiederkehrender Wartungsarbeiten durchgeführt werden, die sicherstellen, dass das Flugzeug die ganze Zeit in einem flugbereiten Zustand bleibt. Beim Parken ist das Ziel, das Flugzeug bei plötzlichem Bedarf schnell wieder in Betrieb nehmen zu können. Von geparkten Flugzeugen können z. B. die Batterien entnommen werden. Ansonsten bleiben aber die Teile am Flugzeug. Ein Flugzeug wird in der Regel nicht länger als sechs Monate geparkt. Wenn klar ist, dass das Flugzeug länger nicht gebraucht wird, dann wird es gelagert. Die Entscheidung zwischen Parken und Lagern ist dabei wieder eine wirtschaftliche Erwägung.



Lagern bei Tarmac Aerosave. Quelle: https://www.tarmacaerosave.aero.

Das Lagern wird genutzt für Luftfahrzeuge, die länger aus dem Betrieb genommen werden sollen. Die Aufgaben die beim Einlagern vorzunehmen sind, sind umfangreicher als beim Parken. Beispiele sind Konservierungsarbeiten wie Abdichten und Fetten. Dafür wird die Anzahl der wiederkehrenden Wartungsarbeiten reduziert. Beispielsweise sind Triebwerksstandläufe und andere Betriebsprüfungen nicht erforderlich. Bei gelagerten Flugzeugen ist es üblicher, dass größere Komponenten entfernt werden. Triebwerke, APUs, Landeklappen und Computer haben alle einen hohen Wert und können auf in Betrieb befindliche Flugzeuge übertragen werden.

---

[8] Airbus, 2020: Protecting Precious Assets – Parking and Storing Aircraft.
Archived at: https://perma.cc/J9C4-EVV8.
Airbus, 2020: Aircraft Parking and Storage. Archived at: https://perma.cc/8AAU-VRX8.

Normalerweise muss ein Flugzeug nach zwei Jahren wieder in Betrieb genommen werden. Erst danach kann es erneut eingelagert werden. Ausnahmen von dieser Regel sind möglich.

Beim Parken und Lagern können sich abhängig vom Klima eine Vielzahl an Bedrohungen für das Flugzeug ergeben. Zu hohe oder zu tiefe Temperaturen sind zu vermeiden, ebenso zu starke Sonneneinstrahlung. Regen, Schnee, salzhaltige Luft, Staub oder Sand können in Luftkanäle eindringen oder Teile beschädigen oder verunreinigen. Extrem starke Winde können Schäden am Flugzeug verursachen. Hohe Luftfeuchtigkeit, Blitzeinschläge und Vulkanasche bedürfen besonderer Beachtung. Nagetiere, Vögel und Insekten können eine zuvor makellose Kabine mit Sitzen, Teppichen und Kabeln beschädigen. Ein Befall kann auch zu verstopften Kanälen führen. Insbesondere das Pitotrohr für die Geschwindigkeitsanzeige ist hier sicherheitskritisch. Bakterien können sich im Trinkwassersystem vermehren. Ein warmes und trockenes Klima gilt als flugzeugschonend. Wüstengebiete sind passend, abgesehen von den hohen Temperaturen und der starken Sonneneinstrahlung. Wenn der Boden von Natur aus fest ist, dann entfällt die Notwendigkeit für eine teure Befestigung des Untergrundes.



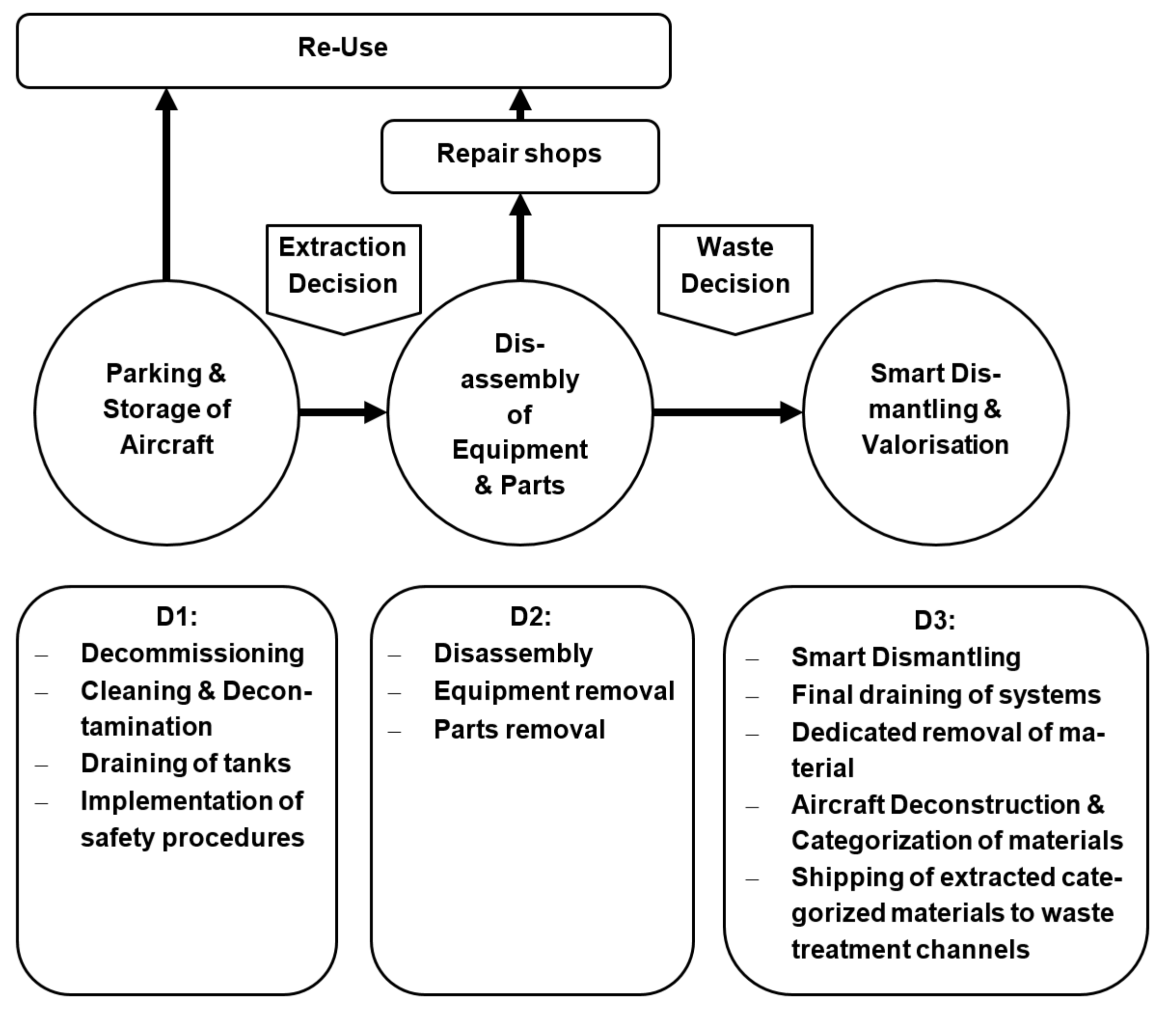
Teruel Airport, Spanien. Anbringen von Folien zum Schutz der Cockpitscheiben für ein Flugzeug, das gelagert werden soll. Quelle: https://www.tarmacaerosave.aero.

Die beiden großen Flugzeughersteller für Zivilflugzeuge Airbus und Boeing starteten beide unabhängig voneinander Forschungsprojekte und Recycling-Testanlagen. Beide Hersteller profitieren von den Ergebnissen ihrer Bemühungen, indem sie die Erkenntnisse in die Entwicklung ihrer Flugzeuge der nächsten Generation integrieren konnten.

Airbus begann 2005 mit dem Projekt PAMELA (Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft) in Zusammenarbeit mit Suez-Sita – einem französischen Recyclingunternehmen – und der Arbeitsgruppe LIFE (l'Instrument Financier pours l'Environnement). Darüber hinaus unterstützte die Europäische Union das Projekt. Drei Ziele wurden gesteckt:

1.) Zeigen, dass 85 % bis 95 % eines Flugzeugs wiederverwendet oder verwertet werden können.
2.) Erstellen eines neuen Standards für die sichere und umweltfreundliche Entsorgung von End of Life Aircraft (ELA).
3.) Starten eines europäischen Netzwerks zur Verbreitung der Erkenntnisse beim Rückbau von Flugzeugen.

Anfang 2006 wurde ein Airbus A300-B2 am Flughafen Tarbes vollständig zerlegt und zurückgebaut. Es war die **weltweit erste Demonstration eines vollständigen Rückbaus eines Passagierflugzeugs**. Es wurde ein dreistufiger Ansatz, der sogenannte 3D-Ansatz, entwickelt. Das Projekt wurde 2007 abgeschlossen.



Der sogenannte 3D-Ansatz des Flugzeugrückbaus aus dem Projekt PAMELA.

Der 3D-Ansatz des Flugzeugrückbaus im Detail.

D1: Während der Stilllegung wird das Flugzeug abgestellt, inspiziert, dekontaminiert und gereinigt. Alle flüssigen Materialien und Gefahrstoffe werden abgelassen und entweder geordnet entsorgt oder zur Wiederverwendung gelagert.

D2: Der zweite Schritt beginnt mit der Planung der vorsichtigen Demontage (disassembly). Alle möglichen Ersatzteile wie Auxiliary Power Unit (APU), Avionik und Fahrwerke werden demontiert, geprüft und gereinigt. Gegebenenfalls erfolgt eine Reparatur vor der Vervollständigung der Teiledokumentation und dem Verkauf dieser Ersatzteile. Nicht mehr flugfähige Teile werden aus Sicherheitsgründen nach der Demontage sofort zerstört.

D3: Im dritten Schritt, beim gewaltsamen Auseinandernehmen (dismantling), unterliegt das Luftfahrzeug nicht mehr dem Luftrecht, sondern muss gemäß allen geltenden Abfallvorschriften behandelt werden. Nach dem Auseinandernehmen werden die anfallenden Materialien sortiert und den entsprechenden Verwertungskanälen zugeführt. Mit PAMELA gelang es, einen generischen Plan zu erstellen, der es der Industrie ermöglicht, jedes beliebige Flugzeug auf umweltfreundliche Weise unter Beachtung von Sicherheitsmaßnahmen und zum wirtschaftlichen Vorteilen zu recyceln und zu entsorgen.



Demontage eines Flugzeugs bei Tarmac Aerosave. Quelle: Airbus, https://perma.cc/SZS7-CDBX.

Nach dem PAMELA-Projekt gründete Airbus zusammen mit anderen Unternehmen die **Tarbes Advanced Recycling and Maintenance Aircraft Company (Tarmac Aerosave)**. Die Inbetriebnahme der Demontageanlage erfolgte 2009 in Tarbes, Frankreich. 2012 hatte das Unternehmen bereits das 100. Flugzeug in Tarbes zurückgebaut. Ein neues Werk wurde 2013 in Teruel, Spanien, eröffnet, gefolgt von Toulouse Francazal, Frankreich, im Jahr 2017. Im Jahr 2020 hat Tarmac Aerosave seit der Gründung insgesamt 170 Flugzeuge recycelt. Die beiden Aktionäre

von Tarmac Aerosave sind neben Airbus heute die Safran-Gruppe und Suez, die jeweils etwa ein Drittel des Unternehmens besitzen. Etwa in der gleichen Zeit sind viele weitere ähnliche Firmen in Europa entstanden.

Boeing verfolgte einen anderen Ansatz, um mit der zunehmenden Zahl von ausgemusterten Flugzeugen umzugehen. In Partnerschaft mit zehn europäischen und amerikanischen Unternehmen **gründete Boeing im April 2006 die Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA)**. Die Gründungsmitglieder stammen aus Branchen wie Abfallwirtschaft, Rohstoffproduktion, Flugzeugwartung und -herstellung, Teilelieferanten und Dienstleistern und verpflichteten sich, ihre gebündeltes Know-how bis hin zur Flugzeugverschrottung auf höchstem technischem Niveau einzusetzen. AFRA ist eine sich selbst finanzierende Non-Profit-Organisation, deren Mitglieder unter einem Zertifikat mit definierten Prozessen arbeiten. Mit der kollektiven Erfahrung der AFRA-Mitglieder wurde ein Leitfaden zur "Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies and for Recycling of Aircraft Materials" (BMP) erarbeitet. Für Mitglieder oder Unternehmen, die eine Mitgliedschaft beantragen, stellt das Dokument die überprüfbaren Standards dar. Ein Unternehmen oder eine Organisation, die sich um eine AFRA-Mitgliedschaft bewirbt verpflichtet sich zur Einhaltung folgender Grundsätze:

- Aus Flugzeugen entnommene Komponenten sind sicher für den weiteren Einsatz.
- Unbrauchbare Komponenten werden verantwortungsvoll entsorgt.
- Nach dem Auseinandernehmen wird die Flugzeugzelle mit ihren verbliebenen Komponenten in Übereinstimmung mit der geltenden Gesetzgebung und den besten Umweltpraktiken entsorgt.

Rund ein Drittel der jährlich weltweit verschrotteten Flugzeuge werden von AFRA-Mitgliedern zerlegt, was den Einfluss des Verbandes auf die Recyclingkultur der Luftfahrt verdeutlicht. AFRA hat auch Kontakt mit der FAA und EASA aufgenommen, um deren BMP-Leitfaden akkreditieren zu lassen und den ersten Schritt in ein gesetzlich kontrolliertes End-oft-Life-Management von Flugzeugen zu machen. Die AFRA-Akkreditierung erlangte großen Einfluss in der Flugzeugrecyclingindustrie. Dementsprechend entscheiden sich Fluggesellschaften mit gesellschaftlichen Ambitionen eher für Recyclingunternehmen mit AFRA-Akkreditierung als für Unternehmen, die einen niedrigeren Preis, aber dafür höhere Unsicherheiten bieten bei ihren Prozessen.

Zwei unterschiedliche Geschäftsmodelle sind beim Rückbau von Flugzeugen zu beobachten.

1.) Beim erste Geschäftsmodell führt das Recyclingunternehmen nur den Flugzeugrecyclingprozess durch und bekommt diese Arbeitsleistung bezahlt, während die Teile und Materialien immer noch dem alten Flugzeugbesitzer gehören. Am Verkauf von Teilen und Material verdient das Recyclingunternehmen dabei nicht, sondern der alte Flugzeugbesitzer.

2.) Das zweite Geschäftsmodell beinhaltet einen Eigentümerwechsel des Flugzeugs. Das Recyclingunternehmen kauft das Flugzeug vom Vorbesitzer zum Schrottpreis. Der Recycler führt dann alle Prozesse wie Dekontamination, Demontage, Teile- und Materialmanagement durch und verkauft schließlich Teile und Materialien, um mehr als den bezahlten Schrottpreis herauszuholen und damit Geld zu verdienen.

Eine besondere Herausforderung stellt die **zunehmende Verwendung von Verbundstoffen** dar, für die es noch keine ausgereiften Recyclingverfahren gibt. Die Boeing 747 kam 1970 noch fast ohne Verbundwerkstoffe aus. Seitdem stieg der Anteil der Verbundstoffe mit jedem neuen Flugzeugtyp an und erreichte mit der Boeing 787 und dem Airbus A350 die Marke von 50 %.

Kohlefaser und Epoxidharz werden am häufigsten in großen Verkehrsflugzeugen verwendet. Zu beachten ist, dass es dabei zwei Arten von Verbundwerkstoffschrott gibt, die separate Recyclingprozesse erfordern. Einerseits entstehen Verbundabfälle bei der Herstellung selbst, andererseits gibt es Verbundteile, die mit dem Flugzeug ihr Lebensende erreichen. Die Faser-Matrix-Kombination wird i.d.R. in einer ungehärteten Prepreg-Rolle zur Herstellung geliefert. Zu den Verschnittabfällen kommen Produktionsabfälle, die das Shelf-Datum erreicht haben und daher nicht mehr verwendet werden können. Der Abfall beträgt etwa 50 % der genutzten Prepreg-Masse. Das Buy-to-Fly-Verhältnis beträgt also 1,5. Die Verbundabfälle aus der Herstellung müssen jetzt entsorgt werden. Die Verbundteile aus dem Flugzeug werden in großer Menge erst in 25 Jahren anfallen. **Die Verbundabfälle können mechanisch, thermisch oder chemisch verarbeitet werden.**

Mechanische Zerkleinerung wird für fast alle Arten von Verbundwerkstoffen verwendet, angefangen von der anfänglichen Zerkleinerung des Abfalls. Die Zerkleinerung ist intensiv erforscht und mit nur geringen Einrichtungskosten verbunden. Nach einem groben schreddern des Schrotts werden die Stücke gemahlen. Anschließend wird das Rezyklat durch Zyklone und Siebe in faserreiche (gröbere) und matrixreiche (feinere) Fraktionen sortiert. Dieses Verfahren produziert kurze Fasern mit schlechten mechanischen Eigenschaften.

Thermische Prozesse nutzen hohe Temperaturen. Für Verbundabfälle gibt es drei verschiedene Verfahren:

1.) Verbrennung nur zur Energiegewinnung,
2.) Verbrennung bei ca. 500 °C mit Energierückgewinnung zum Faserrecycling,
3.) Pyrolyse bei bis zu 800 °C mit Energierückgewinnung zum Faserrecycling.

Die reine Verbrennung (1.) kann nicht wirklich als Recycling bezeichnet werden. Verbundschrott wird bei den Verfahren (2.) und (3.) zunächst mechanisch in handhabbare Stücke zerlegt, die dann einem Wirbelschichtreaktor zugeführt werden. Der heiße Luftstrom zersetzt die Matrix. Die sauberen Fasern werden dann durch einen Zyklon von der Luft getrennt. Schwerere Komponenten wie metallische Komponenten werden nicht mit dem Luftstrom nach oben

getragen und daher separiert. Das Harz aus der Matrix wird in einem Nachbrenner, der Energie erzeugt, vollständig oxidiert. Die resultierenden Fasern haben eine flauschige Form und eine Länge von bis zu 10 mm. Ein Zugfestigkeitsabbau lässt sich bisher nicht verhindern, aber der Elastizitätsmodul und die Oberflächenbeschaffenheit der Recyclingfasern sind mit Frischfasern vergleichbar. Die recycelten Fasern können nur in nicht ausgerichteten Stoffen verwendet werden.

Chemisches Recycling eignet sich für Kohlefaserverbundwerkstoffe mit duroplastischer Matrix (CFK). Die Matrix wird chemisch mit Lösungsmitteln entfernt und dadurch die Faser freigelegt. Temperatur und Druck werden in den Prozessen optimiert. Wasser und Alkohol können als Lösungsmittel eingesetzt werden und bieten den Vorteil, dass sie umweltfreundlich sind. Die Prozesse sind energieintensiv und daher noch nicht wirtschaftlich.

Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy (GLARE) besteht aus vielen, jeweils nur wenige Zehntel Millimeter dicken Schichten. Diese Schichten bestehen abwechselnd aus Aluminium und einem Glasfaserlaminat (glasfaserverstärkter Kunststoff). Die Schichten werden unter Druck verklebt. GLARE zeigt aufgrund des Aufbaus eine sehr schlechte Wiederverwertbarkeit. Trotzdem konnten erfolgreiche Recyclingtechniken entwickelt werden.

Im Gegensatz zu diesen gängigen Entsorgungsstrategien existieren **spezielle Wiederverwendungsansätze**. Die generelle Idee ist, einem Flugzeugbauteil ein zweites Leben außerhalb der Luftfahrt zu geben. Flugzeugtriebwerke könnten als stationäre Motoren in anderen Industriebereichen genutzt werden. Evtl. wäre auch die Verwendung von anderen Flugzeugkomponenten denkbar. Nachdenken könnte man über die Verwendung von Elektro- oder Hydraulikmotoren sowie über Wärmetauscher oder Wassertanks in anderen Industrien. Ein Druckschott könnte als Dach für eine Gartenlaube genutzt werden. Flugzeugrümpfe mit intakter Kabinenausstattung sind schon in der Vergangenheit als Wohnung, Café oder Standesamt genutzt worden. Ingenieure von Airbus verfolgen ein Projekt, einen A380 als Luxushotel in Toulouse aufzustellen[9]. Von der Fliegerei geht immer eine Faszination aus. Daher werden bereits Flugzeugteile als Möbel oder zur Dekoration verkauft. Diese Idee wurde auch von Emirates für das Recycling der A380 ins Gespräch gebracht. Tim Clark, Präsident von Emirates Airline, sagt: "Durch diese Initiative können unsere Kunden und Fans ein Stück Luftfahrtgeschichte mit nach Hause nehmen, während sie wertvolle Materialien vor der Mülldeponie bewahren und mit ihrem finanziellen Beitrag zu einem wohltätigen Zweck beitragen."[10]

---

[9] Flight Global, 2022-02-04: Airbus Engineer’s Project sieht A380 als Luxushotel in Toulouse vor. Archived at: https://perma.cc/92WA-74C7?type=image

[10] Flight Global, 2021-11-01: Emirates Starts Dismantling A380s with Specialist Recruited for Recycling. Archived at: https://perma.cc/GK3J-3WG4



Ingenieure von Airbus verfolgen ein Projekt, einen A380 als Luxushotel in Toulouse aufzustellen. Quelle: https://www.projet-envergure.com.

Eine wichtige Quelle für diesen Text und eine Leseempfehlung:

Maaß, Svenja, 2020. *Aircraft Recycling - A Literature Review*. Projekt. Hamburg University of Applied Sciences, Aircraft Design and Systems Group (AERO). Verfügbar unter: https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2020-04-05.018

Dieser Text ist erschienen online in airliners.de, der Wissensplattform für die deutsche Luftverkehrswirtschaft als:

Scholz, Dieter, 2022-02-25. *Der Produktlebenszyklus eines Flugzeugs endet nicht mit der Ausflottung*. In: airliners.de. Verfügbar unter: https://www.airliners.de/flugzeugbau-zukunft-46-produktlebenszyklus-flugzeugs-endet-ausflottung/63863. Archiviert als: https://perma.cc/5AUE-42VN